

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

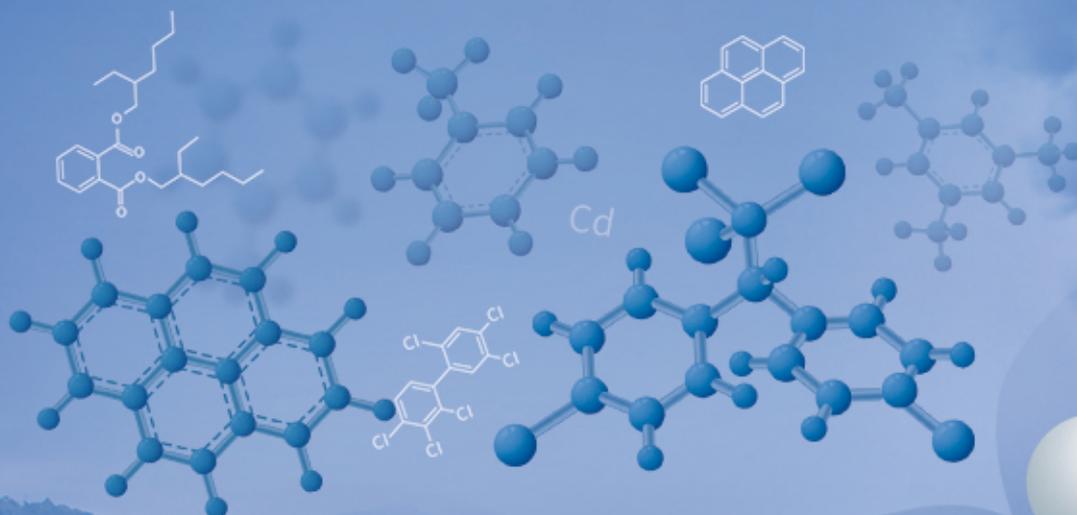
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10



目次

PM_{2.5}化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原PM_{2.5}空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下PM_{2.5}中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季O₃污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区O₃来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区8~9月O₃污染过程VOCs污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的VOCs排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡婧, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于eDNA技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中PPCPs的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对PMS/Co²⁺均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载α-MnO₂活化过一硫酸盐降解2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体MS2的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤DTPA-Cd降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于Web of Science数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及nirS型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田CH₄和N₂O排放对长期大气CO₂浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国84个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响

闫代红^{1,2}, 马亚培^{1,2}, 宋凯悦^{1,2}, 马红亮^{1,2}, 高人^{1,2}, 尹云锋^{1,2*}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

摘要: 以水稻秸秆和杉木凋落物为原料, 选择不同热解温度(350、500和650℃)制备生物炭, 研究原料与热解温度对生物炭中可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)含量和光谱特征的影响。结果表明, 随着热解温度的升高, 两类生物炭 pH 值分别从 8.10 和 6.56 上升至 10.53 和 8.23; 热解温度对生物炭全碳(TC)含量的影响并不明显, 但原料及其与温度交互作用的影响显著($P < 0.05$)。两类生物炭中可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)含量呈先降低后升高的趋势, 相同热解温度下水稻生物炭的显著高于杉木生物炭的($P < 0.05$)。原料对 DOM 芳香化指数(SUVA₂₅₄值)无显著影响, 但温度及其与原料交互作用的影响显著($P < 0.05$), 在 500℃时该值最大, 芳香化程度最高。三维荧光光谱表明, DOM 组分以类富里酸和类腐殖酸为主, 但这两种物质对热解温度的响应不同。傅里叶红外光谱分析发现, 两类生物炭 DOM 在 5 个区域的相似位置存在吸收峰, 其中, 脂肪族 C—H 的伸缩振动随着热解温度的升高逐渐减弱。因此, 高温(500℃和 650℃)与低温(350℃)制备的生物炭相比, DOC 含量降低, 但其芳香化和腐殖化程度升高, 稳定性增强。

关键词: 原料; 热解温度; 交互作用; 生物炭; 可溶性有机质(DOM); 光谱特征

中图分类号: X13 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-5030-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.202010132

Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars

YAN Dai-hong^{1,2}, MA Ya-pei^{1,2}, SONG Kai-yue^{1,2}, MA Hong-liang^{1,2}, GAO Ren^{1,2}, YIN Yun-feng^{1,2*}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The aim of this study was to investigate the effects of feedstock material and pyrolysis temperature on the content and spectral properties of dissolved organic matter (DOM) in biochars. Biochars were produced from the pyrolysis of rice straw and *Cunninghamia lanceolata* litter at three temperatures (350, 500, and 650°C). The results showed that the pH values of the two biochars with pyrolysis temperature increases were improved from 8.10 and 6.56 to 10.53 and 8.23, respectively. The pyrolysis temperature had no significant effect on the total C content of biochar, but the feedstock material and their interaction had significant effects on the total C content of the biochar ($P < 0.05$). The dissolved organic carbon (DOC) content of the two types of biochar first decreased and then increased with increasing pyrolysis temperature, and the content of DOC of the biochar derived from rice straw was significantly higher than that from *Cunninghamia lanceolata* litter under the same temperature ($P < 0.05$). The feedstock material had no significant effect on the SUVA₂₅₄ value of DOM, but temperature and its interactive effect with the feedstock material had a significant effect on the SUVA₂₅₄ values ($P < 0.05$). Maximum DOC SUVA₂₅₄ values occurred at 500°C in the two types of biochar, indicating the highest degree of aromatization. Three-dimensional fluorescence spectra showed that the DOM components of the two types of biochar were dominated by fulvic acid-like and humic acid-like material, which had different responses to pyrolysis temperature. FTIR spectra suggested that the DOM of the biochars had absorption peaks at similar positions, in five regions, and the stretching vibration of aliphatic C—H gradually weakened with an increase in pyrolysis temperature. Therefore, the biochars produced at higher pyrolysis temperatures (500°C and 650°C) had lower DOC contents but a higher aromatization degree and humification degree, and were more stable, compared to the biochars produced at a lower pyrolysis temperature (350°C).

Key words: feedstock material; pyrolysis temperature; interaction; biochar; dissolved organic matter (DOM); spectral property

生物炭是生物质材料在高温缺氧或限氧的条件下热解产生的一类富含碳素和高度芳香化的物质^[1]。近年来,生物炭在土壤改良、污染物修复及温室气体减排等领域展现出广泛的应用前景^[2]。生物炭在制备的过程中除了形成稳定的芳香化结构外,也会随之产生可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)。已有研究表明,生物炭中 DOM 可以直接吸附到土壤表面,增加有机质含量,形成新的吸附位点,进而促进土壤对有机污染物的吸附^[3];由于生物炭中 DOM 具有芳香化合物、羧基和苯酚等有机官能团,重金属和含氧官能团的络合作用,可以减小重金属迁移能力和生物有效性^[4];生物炭中

DOM 还为微生物提供可利用碳源^[5],增强微生物活性,促进了土壤原有机碳的矿化^[6]。因此,施用生物炭需要考虑其释放到环境中 DOM 的数量及其稳定性^[7]。

目前国内外在热解条件对生物炭的理化性质和结构特征方面进行了大量报道,但对其 DOM 的研究关注较少。DOM 结构复杂,传统分析方法存在一

收稿日期: 2020-10-21; 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 福建省公益类重点项目(2020R1002005); 国家自然科学基金项目(31470628, 31770659)

作者简介: 闫代红(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤生态与环境, E-mail: dhyan0329@163.com

* 通信作者, E-mail: yunfengyin@163.com

定的局限性^[8]. 但随着光谱分析手段的发展, DOM 化学组成分析取得了极大的进步. 如紫外可见光谱具有操作简便、选择性好、所需样品量少且不破坏样品结构等优点^[9]; 荧光光谱可以测出 DOM 中类芳香族蛋白质、类富里酸物质和类腐殖酸物质的相对含量等丰富信息^[10]; 红外光谱操作简便快捷, 结构准确可靠, 能够反映出 DOM 中化合物的官能团及比例信息^[11].

原料与热解温度是影响生物炭理化性质的重要因素^[12], 也会影响其 DOM 含量与结构特征. 如 Gao 等^[13]研究不同热解温度(300、500 和 700℃)制备的小麦秸秆生物炭, 发现生物炭中 DOM 含量最小值在 500℃, 且随着热解温度的提高, 腐殖酸类物质的含量增加, 氨基酸类物质的含量降低; 赵敏等^[14]研究 100~700℃下制备的楠竹炭和柏木炭时, 发现柏木炭 DOM 释放量明显高于楠竹炭的. 由于不同研究者采用的原料和热解条件存在差异, 研究结论也不尽相同. 为此, 本文以水稻秸秆(草本)和杉木凋落物(木本)为研究材料, 探讨不同原料和热解温度以及交互作用对生物炭中 DOM 含量及其光谱特征的影响, 以期对生物质资源的合理利用及环境风险评价提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究以水稻秸秆和杉木凋落物为实验材料, 水稻秸秆采自福州市仓山区吴凤村的水稻实验田, 杉木凋落物采自福建省闽北水土保持科教园内.

1.2 生物炭的制备

原料用蒸馏水清洗后自然风干, 再用粉碎机粉碎. 分别称取一定质量的水稻秸秆和杉木凋落物置于瓷坩埚中, 并用锡箔纸将瓷坩埚包裹密封后盖上坩埚盖, 放入马弗炉(500 mm × 200 mm × 180 mm)中. 达到预设温度后(350、500 和 650℃)开始计时 2 h, 之后关闭马弗炉冷却至室温, 得到的黑色固体粉末即为生物炭^[15]. 水稻秸秆和杉木凋落物制备的生物炭分别记为: RB 和 CB, 每个处理重复 4 次. 制备完毕过 2 mm 筛备用.

1.3 测定指标与方法

pH 采用 pH 测定仪(Mettler FE28, 上海)测定, 生物炭与水比例为 1:15(质量比). 生物炭的全碳(TC)和全氮(TN)含量利用碳氮元素分析仪(Elementar VarioEL III, 德国)测定.

样品中 DOM 提取采用水浸提法, 样品与水比例为 1:10(质量比), 滤液用 0.45 μm 滤膜抽滤. DOM 提取液中 DOC 含量采用总有机碳分析仪

(TOC-VCPH/CPN, 日本)测定.

紫外-可见吸收光谱采用紫外可见分光光度计(Shimadzu UV-2450, 日本)测定, 使用光程为 1 cm 的石英比色皿, 以 Mill-Q 水为空白, 波长范围为 200~700 nm, 步长为 1 nm. 用待测液在 254 nm 处的吸光度值来计算 DOM 芳香化指数(SUVA₂₅₄)^[16]:

$$\text{SUVA}_{254} = (\text{UV}_{254}/c) \times 100$$

式中, UV₂₅₄ 为波长 254 nm 处的吸光度值(cm⁻¹), c 为 DOC 浓度(mol·L⁻¹).

荧光光谱采用荧光分光光度计(Hitachi F-7000, 日本)测定, 设置荧光激发和发射光谱狭缝宽度为 5 nm, 扫描速度为 1 200 nm·min⁻¹, 激发波长和发射波长的范围分别为 200~400 nm 和 220~550 nm. 荧光发射光谱腐殖化指数(humification index, emission mode, HIX_{em})的计算公式为:

$$\text{HIX}_{\text{em}} = S_{435-480}/S_{300-345}$$

式中, S₄₃₅₋₄₈₀ 和 S₃₀₀₋₃₄₅ 分别为发射光谱中波长 435~480 nm 和 300~345 nm 的面积. 荧光同步光谱腐殖化指数(humification index, synchronous mode, HIX_{syn})的计算公式为:

$$\text{HIX}_{\text{syn}} = I_{460}/I_{345}$$

式中, I₄₆₀ 和 I₃₄₅ 分别为同步光谱中波长 460 nm 和 345 nm 处的荧光强度^[17,18]. 根据 Chen 等^[10]提出的荧光区域积分法, 将三维荧光光谱划分为 5 个区域(表 1).

表 1 三维荧光峰的主要归属

Table 1	Main attributes of the three-dimensional fluorescence peaks		
荧光峰区	激发波长 /nm	发射波长 /nm	荧光团
I	200~250	280~330	类酪氨酸蛋白质物质
II	200~250	330~380	类色氨酸蛋白质物质
III	200~250	380~550	类富里酸物质
IV	>250	280~380	类溶解性微生物代谢产物
V	>250	380~550	类腐殖酸物质

红外光谱采用傅里叶变换红外光谱仪(Agilent Cary 660-FTIR, 日本)测定, 设置扫描范围为 4 000~400 cm⁻¹, 将 1 mg 冷冻干燥的 DOM 样品与 400 mg 干燥的溴化钾(KBr)磨细混匀, 在 10 t·cm⁻²压强下压制 30 s, 压成透明薄片后上机测定并记录其光谱^[19]. 表 2 为红外吸收峰的主要归属^[20,21].

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 19.0 对数据进行方差分析, 利用多重比较分析不同处理间差异显著性. 采用 Origin 2017 作图. 图表中数据为平均值 ± 标准差.

表 2 红外吸收峰的主要归属

Table 2 Main attributes of infrared absorption peaks

波数/cm ⁻¹	主要归属
3 000 ~ 4 000	H 键键合的—COOH、醇及苯酚中的—OH 的伸缩振动
2 850 ~ 2 960	脂肪族饱和 C—H 键的伸缩振动吸收区
1 600 ~ 1 750	C=O 和芳环的伸缩振动
1 054 ~ 1 061	脂肪族上 C—O—C 的伸缩振动
788 ~ 881	芳香族上 C—H 的伸缩振动

2 结果与分析

2.1 生物炭的基本性质

由表 3 可知,当热解温度为 350℃ 时, RB 和 CB 的 pH 值分别为 8.10 和 6.56, 当温度升至 650℃, 分别为 10.53 和 8.23. 此外, 在相同热解温度下, RB 的 pH 值显著高于 CB 的 ($P < 0.05$). RB 的 TC 和 TN 含量均随着热解温度的升高而降低, 但 CB 则不

表 3 不同生物炭的基本性质¹⁾

Table 3 Basic properties of the different biochars

指标	类型	温度/℃		
		350	500	650
pH	RB	8.10 ± 0.32bA	10.44 ± 0.07aA	10.53 ± 0.05aA
	CB	6.56 ± 0.17cB	7.58 ± 0.23bB	8.23 ± 0.06aB
TC/g·kg ⁻¹	RB	423.27 ± 12.64aB	403.86 ± 5.67abB	382.98 ± 20.96bB
	CB	633.29 ± 8.81bA	672.95 ± 19.78aA	687.16 ± 19.04aA
TN/g·kg ⁻¹	RB	12.26 ± 0.28aA	9.95 ± 0.70bA	7.25 ± 0.69cB
	CB	8.97 ± 0.68bB	9.80 ± 0.40aA	9.13 ± 0.27abA

1) 不同大写字母表示同一温度在不同原料间差异显著, 不同小写字母表示同一原料在不同温度间差异显著 ($P < 0.05$)

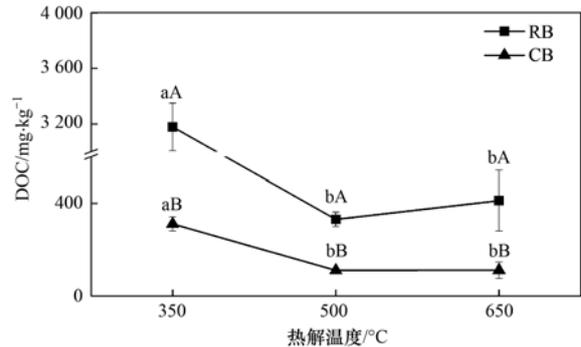
同, TC 含量随着热解温度的升高有所上升, 而 TN 含量在 500℃ 时达到了最大.

2.2 生物炭的 DOM 含量

如图 1 所示, RB 和 CB 的 DOC 含量随热解温度变化的趋势相似, 与 350℃ 制备的相比, 500℃ 制备的 RB 和 CB 的 DOC 含量分别显著下降了 89.6% 和 64.4% ($P < 0.05$); 而 650℃ 制备的 RB 和 CB 的 DOC 含量则略有上升. 此外, 在相同热解温度下, RB 的 DOC 含量均显著高于 CB 的 ($P < 0.05$), 在 350℃ 时差异最大.

2.3 生物炭的 DOM 光谱特征

由图 2 可知, 两类生物炭中 DOM 的 SUVA₂₅₄ 值均在 500℃ 时达到最大, 且 RB 中 3 种热解温度下制备的生物炭 SUVA₂₅₄ 值差异均达到了显著水平 ($P < 0.05$). 随着热解温度的升高, RB 和 CB 的 HIX_{em} 分别由最初 350℃ 的 5.54 和 1.66, 增加至 650℃ 的 8.14 和 4.74, 差异显著 ($P < 0.05$). 在 RB 中,



不同大写字母表示同一温度在不同原料间差异显著, 不同小写字母表示同一原料在不同温度间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同生物炭的 DOC 含量

Fig. 1 DOC content of the different biochars

HIX_{syn} 值呈现 650℃ > 500℃ > 350℃ 的趋势; 而 CB 中 3 种热解温度间 HIX_{syn} 值无显著差异. 此外, 相同热解温度下的 HIX_{em} 和 HIX_{syn} 值均呈现 RB 的显著高于 CB 的 ($P < 0.05$).

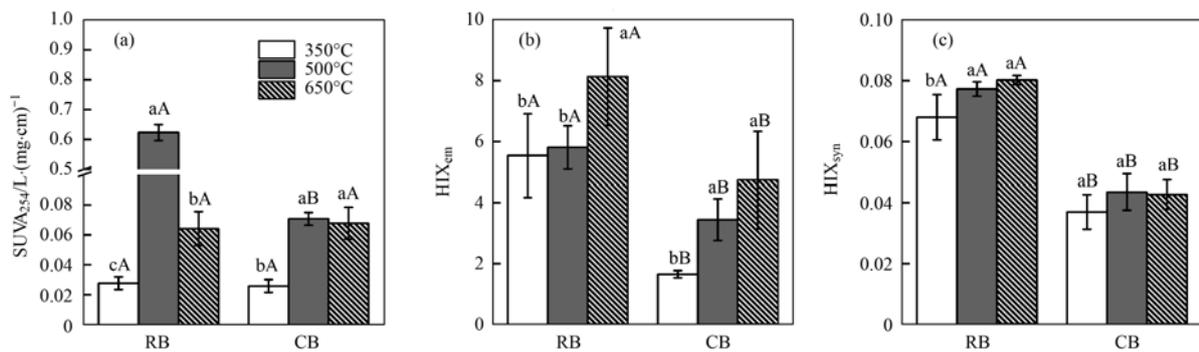


图 2 不同生物炭中 DOM 的紫外/荧光相关参数

Fig. 2 Ultraviolet and fluorescence related parameters of the DOM in the different biochars

本研究中,不同处理生物炭中 DOM 的荧光峰主要位于两个区域(图 3),即类富里酸物质荧光峰 A(E_x 和 E_m 分别在 200 ~ 250 nm 和 380 ~ 550 nm)和类腐殖酸物质荧光峰 B(E_x 和 E_m 分别在 > 250 nm 和 380 ~ 550 nm),但各处理的荧光强度和峰面积存在差异. 在 RB 中,两种物质的荧光强度和峰面积在 500°C 时最弱,而在 CB 中则正好相反. 此外,在相同热解温度下, RB 的两种物质的荧光强度均显著

强于 CB 的(500°C 除外).

如图 4 所示,两类生物炭分别在 3 440 cm^{-1} 和 3 419 cm^{-1} 处出现一个较强的吸收峰; 在 2 952 cm^{-1} 和 2 930 cm^{-1} 处的吸收峰随温度的升高而减弱; 在 1 054 cm^{-1} 和 1 061 cm^{-1} 处,温度为 500°C 和 650°C 时, RB 在此处的吸收峰相较于 350°C 时明显增强,但 CB 则无显著变化. 从整体上看, RB 的吸收峰强于 CB 的.

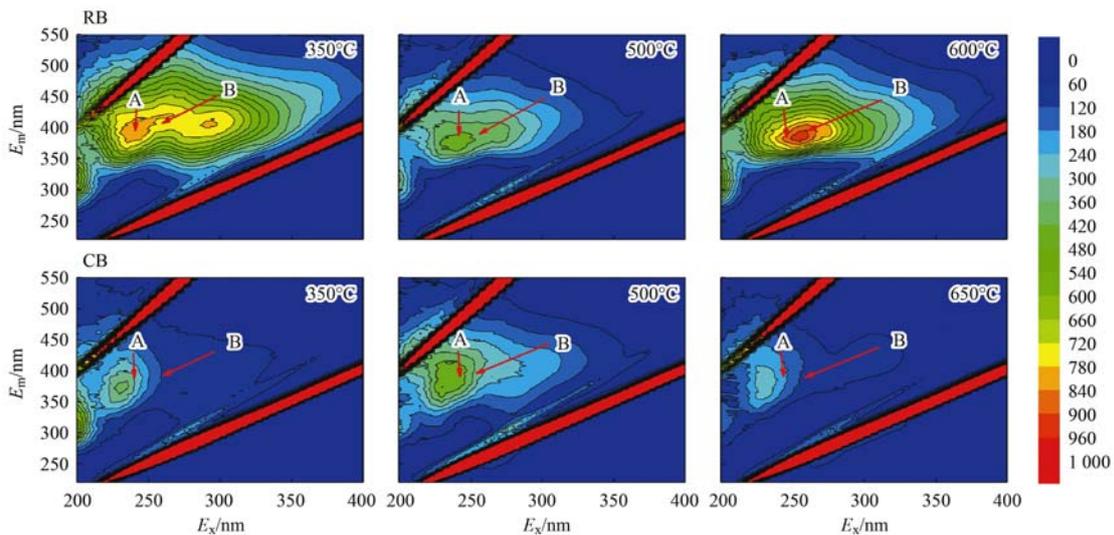


图 3 不同生物炭中 DOM 三维荧光光谱

Fig. 3 Three-dimensional fluorescence spectra of the DOM in the different biochars

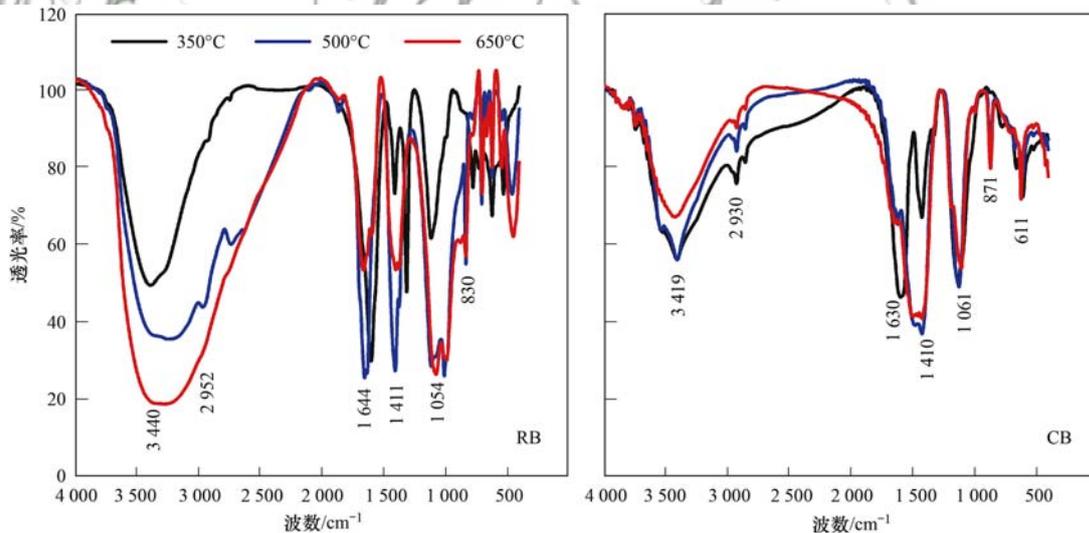


图 4 不同生物炭中 DOM 的红外光谱

Fig. 4 Infrared spectrum of the DOM in the different biochars

2.4 原料与热解温度及其交互作用对生物炭基本性质和 DOM 光谱指标的影响

由表 4 可知,原料显著影响了生物炭的基本性质指标以及 HIX_{em} 和 HIX_{syn} 指数 ($P < 0.05$); 不同温度对生物炭基本性质指标 (TC 除外) 和 DOM 的光谱指标具有极显著的影响 ($P < 0.01$); 原料与温度的交互作用对生物炭基本性质指标和 SUVA_{254} 值的

影响亦达到了极显著水平 ($P < 0.01$).

3 讨论

3.1 不同原料和温度对生物炭基本性质的影响

本研究发现,水稻和杉木制备的生物炭 pH 值随着热解温度的升高呈增加趋势,原因在于热解温度升高使得矿质元素如 Na、K、Ca 和 Mg 等相对富

表 4 原料与热解温度及交互作用对生物炭基本性质和 DOM 光谱指标的显著性分析

处理	原料		温度		原料 × 温度	
	F	P	F	P	F	P
pH	939.372	0.000	300.431	0.000	27.811	0.000
TC	1 678.073	0.000	0.873	0.434	18.579	0.000
TN	5.541	0.030	42.382	0.000	46.552	0.000
DOC	923.796	0.000	728.420	0.000	547.256	0.000
HIX _{em}	46.767	0.000	12.463	0.000	0.914	0.419
HIX _{syn}	219.261	0.000	7.435	0.004	0.130	0.879
SUVA ₂₅₄	2.489	0.132	216.369	0.000	109.350	0.000

集,并以氧化物或碳酸盐的形式存在于灰分中,导致 pH 值升高^[22].有研究表明,草本植物组分中矿质元素含量高于木本植物的^[23],所以秸秆炭的 pH 值显著高于木炭的.随着温度的升高,杉木生物炭的 TC 含量增加,这是因为炭化程度加快,残留的碳元素累积,含量增加^[24]; TN 含量在 650℃ 时反而降低,这可能是 N 主要存在于生物炭复杂的芳香环状结构中,在低温的条件下表现为一定的热稳定性^[25].而水稻生物炭的 TC 和 TN 含量则与热解温度呈负相关,孙小飞等^[26]的研究(水稻秸秆在 350~750℃ 下制备生物炭)也发现类似现象.此外,热解温度对生物炭 TC 含量的影响并不明显,但原料及其与温度交互作用的影响显著,且杉木生物炭的显著高于水稻生物炭的,这与杉木中木质素含量较高有关.

3.2 不同原料和温度对生物炭中 DOC 含量的影响

本研究中水稻和杉木两类生物炭 DOC 含量在 3 种热解温度下变化趋势相似,且在 500℃ 时 DOC 含量最低,原因在于低温时生物大分子首先通过脱水和脱甲基反应被分解为挥发性物质^[27],温度持续升高时,原料中半纤维素和纤维素基本分解完成,一些有机成分的化学键断裂并重排^[28, 29],发生分解、缩合、环化和聚合等一系列反应,从而形成稳定的多芳香烃类物质,由此导致生物炭中 DOC 含量下降.当温度升至 650℃ 时,发生芳香碳的缩聚反应,碳结构重组或二次分解,导致 DOC 含量略有上升^[30].此外,原料及其与温度的交互作用也显著影响了生物炭中 DOC 含量,水稻生物炭中 DOC 含量在相同温度下均显著高于杉木生物炭的,可能原因是木本原料相较于草本含有比半纤维素和纤维素更稳定的木质素,更有利于形成不溶性生物炭,进而降低生物炭中 DOC 含量^[31].

3.3 不同原料和温度对生物炭的 DOM 光谱特征的影响

SUVA₂₅₄ 值可以表征 DOM 中较难分解的芳香类化合物,数值越大表示 DOM 中大分子腐殖酸物质含量越多^[32],芳香性化合物比例越大.原料对生物

炭 DOM 的 SUVA₂₅₄ 值无显著影响,但温度及其与原料的交互作用却影响显著(表 4).本研究中,两类生物炭中 DOM 的 SUVA₂₅₄ 值均随热解温度的升高先增大后减小,Wei 等^[33]以稻秆、松木、猪粪和污泥为原料在不同温度下(300~700℃)制备生物炭,同样发现在较低温度(≤500℃)时生物炭 DOM 的 SUVA₂₅₄ 值增加,当温度持续升高(>500℃)时则减小.原因是低温(350℃和 500℃)时,由于半纤维素和纤维素等有机组分分解得较快,木质素组分分解得较慢,导致 DOM 中含有较多的芳香类结构,从而使 SUVA₂₅₄ 值增加;而当温度持续升高,使得芳香类溶解性有机组分开始不断地降解去除,生成一些小分子的有机物,从而使得 SUVA₂₅₄ 值降低.

两类生物炭中 DOM 组分以类富里酸和类腐殖酸为主,但不同处理的荧光强度存在差异.当热解温度增加到 500℃ 时,水稻生物炭 DOM 中类富里酸和类腐殖酸荧光强度减弱,这是由于生物炭在热解过程中产生了数量不等的类富里酸和类胡敏酸,且生成的类腐殖酸物质在高温条件下经过分解、冷凝和聚合等导致类富里酸和类胡敏酸含量降低^[34],同时含有更多结构复杂且不易分解的芳香化组分,这与本文 SUVA₂₅₄ 和 HIX 值的变化基本一致.而当热解温度为 650℃ 时,DOM 荧光强度有所增强.在水稻生物炭中,350℃ 时类腐殖酸荧光强度高于类富里酸,当升温至 500℃ 时则相反,这是因为与类腐殖酸物质相比,类富里酸物质的分子量更小,溶解度更高^[35].随着热解温度升高,低温中分子量较大的类腐殖酸物质进一步分解为更加稳定的小分子富里酸类物质^[36],生物炭中 DOM 的稳定性增强.

本研究中,3 419 cm⁻¹ 的吸收峰为醇及苯酚中—OH 的伸缩振动,在杉木生物炭中,当温度升至 650℃ 时该峰值明显减弱,这是由于结合水的脱离导致羟基减少,DOM 中—OH 峰降低.2 930 cm⁻¹ 和 2 952 cm⁻¹ 处的吸收峰为生物高分子聚合物(如纤维素、半纤维素和木质素)上的脂肪族 C—H 伸缩振动,当热解温度为 650℃ 时,两类生物炭峰值均明

显减弱,甚至水稻生物炭的消失,表明 DOM 中脂肪族官能团结构可能随着脂肪族化合物逐渐分解而去除,烷基基团逐渐消失^[37]. 830 cm^{-1} 和 871 cm^{-1} 处的芳香化 C—H 的吸收峰随着热解温度的升高越来越明显,水稻生物炭在 500 $^{\circ}\text{C}$ 时最强,表明 DOM 中芳香环结构最多,芳香化最强,这与本文中 SUVA_{254} 的变化一致,而杉木生物炭在 500 $^{\circ}\text{C}$ 和 650 $^{\circ}\text{C}$ 时无显著差异. 此外,由于原料的差异,两类生物炭 DOM 红外吸收峰呈现出一定的差异. 如在 1 054 cm^{-1} 和 1 061 cm^{-1} 处是脂肪族 C—O—C 的伸缩振动,当热解温度为 500 $^{\circ}\text{C}$ 和 650 $^{\circ}\text{C}$ 时,水稻生物炭的 DOM 中该吸收峰相较于 350 $^{\circ}\text{C}$ 时明显增强,但杉木生物炭的 C—O—C 官能团未发生显著变化.

4 结论

(1) 随着热解温度升高,水稻秸秆和杉木凋落物制备的生物炭 pH 值均增加;热解温度对生物炭 TC 含量无显著影响,但原料及其与温度的交互作用则影响显著,且杉木生物炭 TC 含量显著高于相同温度下水稻生物炭的.

(2) 原料与热解温度以及两者交互作用均对生物炭中 DOC 含量有显著影响. 高温热解与低温制备的生物炭相比,其 DOC 含量显著降低,并且相同制备温度下水稻生物炭的 DOC 含量显著高于杉木生物炭的.

(3) 生物炭中 DOM 组分以类富里酸和类腐殖酸为主,高温热解与低温制备的生物炭相比,DOM 腐殖化和芳香化程度显著提高,在相同制备温度下水稻生物炭的 DOM 腐殖化和芳香化程度均高于杉木生物炭的.

参考文献:

- [1] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, *et al.* Biochar effects on soil biota-A review [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43** (9): 1812-1836.
- [2] Zhai X Q, Li Z W, Huang B, *et al.* Remediation of multiple heavy metal-contaminated soil through the combination of soil washing and in situ immobilization [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **635**: 92-99.
- [3] 王开峰, 彭娜, 何江, 等. 污泥生物炭中水溶性有机物的三维荧光光谱特征及其与铜的络合 [J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(10): 151-156.
Wang K F, Peng N, He J, *et al.* Characterization of sludge biochar-derived dissolved organic matter using three-dimension EEM fluorescence spectroscopies and its complexation by Cu [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(10): 151-156.
- [4] Sui F F, Zuo J, Chen D, *et al.* Biochar effects on uptake of cadmium and lead by wheat in relation to annual precipitation: a 3-year field study [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(4): 3368-3377.
- [5] 王国兵, 王瑞, 徐瑾, 等. 生物炭对杨树人工林土壤微生物量碳、氮、磷及其化学计量特征的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2019, **43**(2): 1-6.
Wang G B, Wang R, Xu J, *et al.* Effects of biochar application on microbial biomass C, N, P and stoichiometry characteristics of poplar plantation soil [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2019, **43**(2): 1-6.
- [6] 陈颖, 刘玉学, 陈重军, 等. 生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展 [J]. *应用生态学报*, 2018, **29** (1): 314-320.
Chen Y, Liu Y X, Chen C J, *et al.* Priming effect of biochar on the mineralization of native soil organic carbon and the mechanisms: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(1): 314-320.
- [7] Wang B Y, Zhang W, Li H, *et al.* Micropore clogging by leachable pyrogenic organic carbon: a new perspective on sorption irreversibility and kinetics of hydrophobic organic contaminants to black carbon [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 1349-1358.
- [8] 刘翥, 杨玉盛, 司友涛, 等. 植被恢复对侵蚀红壤可溶性有机质含量及光谱学特征的影响 [J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(11): 1174-1183.
Liu Z, Yang Y S, Si Y T, *et al.* Effects of vegetation restoration on content and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter in eroded red soil [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(11): 1174-1183.
- [9] 李帅东, 姜泉良, 黎焯, 等. 环滇池土壤溶解性有机质 (DOM) 的光谱特征及来源分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(5): 1448-1454.
Li S D, Jiang Q L, Li Y, *et al.* Spectroscopic characteristics and sources of dissolved organic matter from soils around Dianchi Lake, Kunming [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(5): 1448-1454.
- [10] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [11] Liu S S, Zhu Y R, Liu L Z, *et al.* Cation-induced coagulation of aquatic plant-derived dissolved organic matter: Investigation by EEM-PARAFAC and FT-IR spectroscopy [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 726-734.
- [12] 赵力, 陈建, 李浩, 等. 裂解温度和酸处理对生物炭中持久性自由基产生的影响 [J]. *环境化学*, 2017, **36**(11): 2472-2478.
Zhao L, Chen J, Li H, *et al.* Effect of pyrolysis temperature and acid treatment on the generation of free radicals in biochars [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(11): 2472-2478.
- [13] Gao J K, Shi Z Y, Wu H M, *et al.* Fluorescent characteristics of dissolved organic matter released from biochar and paddy soil incorporated with biochar [J]. *RSC Advances*, 2020, **10**(10): 5785-5793.
- [14] 赵敏, 陈丙法, 冯慕华, 等. 不同裂解温度下生物炭释放溶解性有机质的光谱特征分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, **40**(8): 2505-2511.
Zhao M, Chen B F, Feng M H, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter released from biochar at different pyrolysis temperatures [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, **40**(8): 2505-2511.
- [15] Hamer U, Marschner B, Brodowski S, *et al.* Interactive priming of black carbon and glucose mineralisation [J]. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**(7): 823-830.
- [16] 陈滢伊, 司友涛, 鲍勇, 等. 隔离降雨对亚热带米楮天然林土壤可溶性有机质数量及光谱学特征的影响 [J]. *应用生态*

- 学报, 2019, **30**(9): 2964-2972.
- Chen Y Y, Si Y T, Bao Y, *et al.* Effects of rainfall reduction on the quantity and spectroscopic characteristics of soil dissolved organic matter in a subtropical natural *Castanopsis carlesii* forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(9): 2964-2972.
- [17] 闫金龙, 江韬, 赵秀兰, 等. 含生物质炭城市污泥堆肥中溶解性有机质的光谱特征[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 459-465.
- Yan J L, Jiang T, Zhao X L, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in co-composting process of municipal sludge with biochar[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(2): 459-465.
- [18] 狄丽燕, 孔范龙, 王森, 等. 胶州湾滨海湿地凋落物分解对土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(22): 8483-8493.
- Di L Y, Kong F L, Wang S, *et al.* Effect of litter decomposition on mineralization of soil organic carbon in the Jiaozhou Bay coastal wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(22): 8483-8493.
- [19] 程蕾, 林开森, 周嘉聪, 等. 氮沉降对毛竹林土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(5): 1754-1762.
- Cheng L, Lin K M, Zhou J C, *et al.* Effects of nitrogen deposition on the concentration and spectral characteristics of dissolved organic matter in soil in Moso bamboo plantations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(5): 1754-1762.
- [20] 占新华, 周立祥, 杨红, 等. 水溶性有机物与多环芳烃结合特征的红外光谱学研究[J]. 土壤学报, 2007, **44**(1): 47-53.
- Zhan X H, Zhou L X, Yang H, *et al.* Infrared spectroscopy of DOM-PAHs complexes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(1): 47-53.
- [21] Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(14): 5137-5143.
- [22] 丁思惠, 方升佐, 田野, 等. 不同热解温度下杨树各组分生物质炭的理化特性分析与评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, **44**(6): 193-200.
- Ding S H, Fang S Z, Tian Y, *et al.* Analysis and evaluation on physicochemical properties of poplar biochar at different pyrolysis temperatures[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, **44**(6): 193-200.
- [23] 周强, 黄代宽, 余浪, 等. 热解温度和时间对生物炭 pH 值的影响[J]. 地球环境学报, 2015, **6**(3): 195-200.
- Zhou Q, Huang D K, Yu L, *et al.* Effects of pyrolysis temperature, time and biochar mass ratio on pH value determination for four biochar solutions [J]. Journal of Earth Environment, 2015, **6**(3): 195-200.
- [24] Chen Y Q, Yang H P, Wang X H, *et al.* Biomass-based pyrolytic polygeneration system on cotton stalk pyrolysis: influence of temperature [J]. Bioresource Technology, 2012, **107**: 411-418.
- [25] Usman A R A, Abduljabbar A, Vithanage M, *et al.* Biochar production from date palm waste: charring temperature induced changes in composition and surface chemistry [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015, **115**: 392-400.
- [26] 孙小飞, 陈智伟, 李宇轩, 等. 不同热解温度对生物质炭 8 种元素含量的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2019, **35**(1): 55-61, 74.
- Sun X F, Chen Z W, Li Y X, *et al.* Influence of different pyrolysis temperatures on eight elements content of biochar[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2019, **35**(1): 55-61, 74.
- [27] Dutta T, Kwon E, Bhattacharya S S, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: a review [J]. GCB Bioenergy, 2017, **9**(6): 990-1004.
- [28] 孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 等. 不同原料生物炭理化性质的对比分析[J]. 农业资源与环境学报, 2017, **34**(6): 543-549.
- Sun T, Zhu X P, Li D P, *et al.* Comparison of biochars characteristics from different raw materials [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, **34**(6): 543-549.
- [29] Liu Z X, Niu W J, Chu H Y, *et al.* Effect of the carbonization temperature on the properties of biochar produced from the pyrolysis of crop residues [J]. Bioresources, 2018, **13**(2): 3429-3446.
- [30] 李飞跃, 桂向阳, 许吉宏, 等. 生物炭中溶解性有机质的光谱分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, **39**(11): 3475-3481.
- Li F Y, Gui X Y, Xu J H, *et al.* Spectral analysis of dissolved organic matter from biochar [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, **39**(11): 3475-3481.
- [31] Mukherjee A, Zimmerman A R, Harris W. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars [J]. Geoderma, 2011, **163**(3-4): 247-255.
- [32] Ouyang L, Wang F, Tang J, *et al.* Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, **13**(4): 991-1002.
- [33] Wei S Y, Zhu M B, Fan X J, *et al.* Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge [J]. Chemosphere, 2019, **218**: 624-631.
- [34] Smith C R, Sleighter R L, Hatcher P G, *et al.* Molecular characterization of inhibiting biochar water-extractable substances using electrospray ionization Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(23): 13294-13302.
- [35] Rajapaksha A U, Ok Y S, El-Naggar A, *et al.* Dissolved organic matter characterization of biochars produced from different feedstock materials [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **233**: 393-399.
- [36] 蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 等. 热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2963-2971.
- Cai Z H, Chu C J, Zheng H, *et al.* Effect of pyrolytic temperature and time on characteristics of *Typha angustifolia* derived biochar and preliminary assessment of the ecological risk [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2963-2971.
- [37] 郭平, 王观竹, 许梦, 等. 不同热解温度下生物质废弃物制备的生物质炭组成及结构特征[J]. 吉林大学学报(理学版), 2014, **52**(4): 855-860.
- Guo P, Wang G Z, Xu M, *et al.* Structure and composition characteristics of biochars derived from biomass wastes at different pyrolysis temperatures [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2014, **52**(4): 855-860.

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)